

氏 名	坂 谷 勝 明
生 年 月 日	
本 籍	石川県
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博甲第186号
学位授与の日付	平成8年3月25日
学位授与の要件	課程博士 (学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	硬ぜい性材料の電場・磁場援用研磨に関する研究 (Electric and Magnetic Field-assisted Fine Finishing of Hard and Brittle Materials)
論文審査委員	(主査) 黒 部 利 次 (副査) 小 村 照 寿, 上 田 隆 司 山 田 良 穂, 白 瀬 敬 一

学位論文要旨

Abstract

New field-assisted fine finishing (FFF) methods for hard and brittle materials such as semiconductors and optical glasses have been developed. These offer the possibility of controlling the surface roughness and stock removal rate by utilizing the electrophoresis phenomenon of the grain and magnetic fluid. And also, a new polishing method for numerically controlled ultra fine polishing is proposed, in which the offset of the polisher to the designed profile is controlled to be constant in non-contact and the feed rate of polisher is fixed instead of polishing lord.

The results obtained through polishing experiments are summarized as follows:

(1) Efficient fine finishing of optical glass is conducted by using an electrophoresis phenomenon of fine grain in the water, which offer the surface roughness of the order of nanometers and high stock removal rate.

(2) In GLP (Grinding-like polishing) using magnetic fluid, ultra fine polishing of the non-contact type is realized with fluid grinding wheel. This method can be applied to the polishing on NC grinding machine without the vessels for polishing compound.

(3) In the method for ultra fine NC polishing, the stock removal rate is independent of the viscosity of polishing compound, but the surface roughness is improved with the increase of it.

1. 緒 言

超精密加工は、これまで量産化よりはむしろ高精度化に主眼を置く技術であり、経済性は二の次にされてきた。しかし最近、情報機器や精密機器が高性能化、高機能化、小型化するのにもともなって、それらを構成する部品には、安価で高能率な加工法が求められるようになり、超精密加工される製品にも、生産性の向上と量産化が求められてきている。このように、高能率化と高精度化という相矛盾した加工方法が要求されるような状況下にあって、F F F (Field-assisted Fine Finishing) と呼ばれる加工法は、電場や磁場などにより微粒粉末砥粒に力を与えてその運動を制御して表面研磨を行う方法として、加工能率などを電磁氣的に制御することが可能である点や自由曲面の研磨加工への発展の可能性がある点などから注目されている。

本研究ではこうした状況を踏まえ、このF F F加工の概念をさらに発展させるため、電気泳動現象および磁性流体を利用した新しい超精密研磨法を提案する。また、これらの研磨法を最近の超精密加工機械に適用し、超高精度なNC研磨加工を実現するための技術的課題について研究を進めていく。

2. 電気泳動現象利用による 光学ガラスの超精密研磨

2.1 電気泳動現象利用による加工の原理

電気泳動現象とは、液体中に分散している砥粒に電場をかけたとき、砥粒が表面の電荷により運動する現象で、電場の大きさを変えることにより、その運動を電氣的に制御できると考えられる。砥粒運動を制御して加工能率を向上させるには、加工面に砥粒を引き付ける方式とポリシャ表面に集中させる方式の2通りの方法が考えられる。

本研究では、後者の方式により、図1に示すような研磨装置を用いて光学ガラス(BK7)の研磨加工実験を行った。装置は、2つの回転軸からなり、水平回転軸の先端には円盤状ポリシャが取り付けられている。垂直回転軸の上部には加工液を満たすためのステンレス鋼製研磨槽が取り付けられ、その底部中心に加工試料が固定され

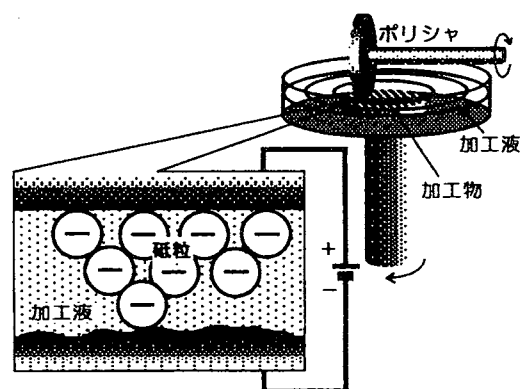


図1 電気泳動研磨の加工原理

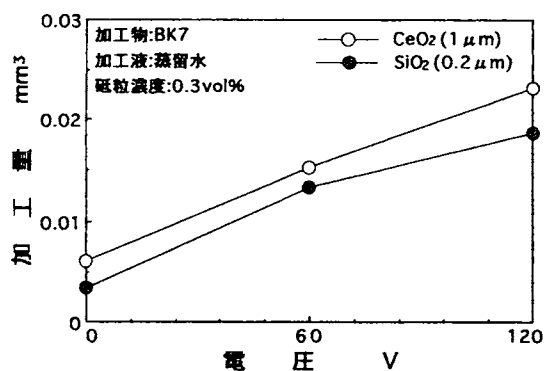


図2 電圧と加工量の関係

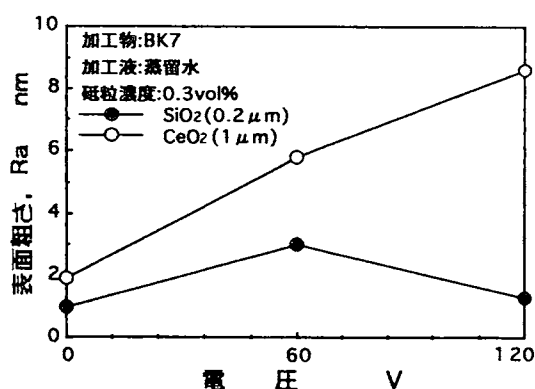


図3 電圧と表面粗さの関係

る。水平回転軸はそれと直交する軸の回りに自由に回転できるようになっており、ポリシャの回転による動圧でポリシャと加工面の間にクリアランスが生じる。直流電圧は、ポリシャが正、研磨槽が負に帯電するように印加し、負に帯電した砥粒がポリシャの表面に集中するようになっている。

2.2 実験結果

図2に、水平回転軸を一定速度で直線移動させながら、CeO₂砥粒（粒径1 μm）およびSiO₂砥粒（粒径0.2 μm）により研磨したときの電圧と加工量の関係を示す。加工量は電圧の増大につれて増加し、砥粒の種類の違いによる差はほとんどないことがわかる。また図3は、この場合の研磨面の表面粗さ測定結果を示す。これら結果から、SiO₂砥粒を用いた場合には、電圧を印加することにより加工量は約4倍に向上し、かつ、印加電圧の影響をほとんど受けずに、nmオーダの表面粗さが得られることが確認できる。

3. 磁性流体を利用したGLP (Grinding-like Polishing)

3.1 加工原理と実験方法

磁性流体を利用した磁気研磨法は、磁性流体が磁気に応答する性質と普通の流体と同じ流動性を合わせもつことを利用して、砥粒に作用する研磨圧などを制御して加工を行う方法である。

本研究では、この作用を応用して、ポリシャの内部に強力な永久磁石を組込むことにより一種の流体砥石を形成するもので、これをGLP (Grinding-like Polishing) と称している。その加工原理を図4に示す。ポリシャ内に組込まれた永久磁石の磁気力により、砥粒が混入された磁性流体はポリシャ外周部に保持される。また、磁性流体中に混入した砥粒は、磁性流体のもつ粘性や表面張力により流体内部に保持されるため、ポリ

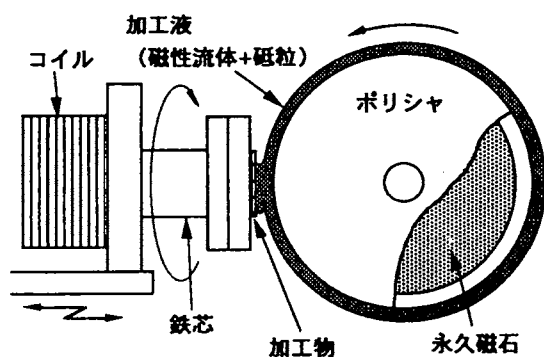


図4 GLPの加工原理

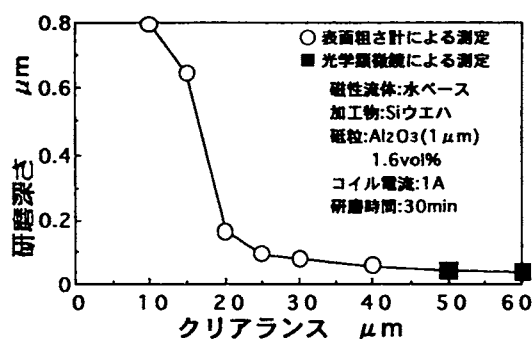


図5 クリアランスと研磨深さの関係

シャを回転させると、砥粒は磁性流体とともに回転して、砥石の砥粒のように加工面に作用する。これにより、加工液を溜めるための研磨液槽や加工物の移し変えを必要としない、研削加工型の新しい最終仕上げ研磨法を開発し、そのアタッチメント化による研削加工と最終仕上げ研磨加工の一体化をめざしている。

研磨実験では、加工液に水とケロシンベースの2種類の磁性流体を使用して、 Al_2O_3 砥粒（粒径：0.06, 1, 12.5 μm ）を1.6vol% 混入し、1回の研磨毎に10mlずつポリシャ外周面に磁着させた。加工試料は、ポリシ加工されたシリコンウエハを用いた。

3.2 研磨能率への影響

図5は、水ベースの磁性流体により、コイル電流1.0Aで30分間研磨したときの、ポリシャと加工面とのクリアランスと研磨深さの関係を示す。この図から、クリアランスが15 μm を超えると加工能率が極端に減少することがわかる。これは、クリアランスが砥粒径に比べ著しく大きくなると、加工面上にある砥粒の加工面に対する相対速度が小さくなり、加工作用がほとんど進行しなくなるためと考えられる。

3.3 表面粗さへの影響

水ベースの磁性流体を用いて、3種類の粒径の砥粒により30分間研磨した面の表面微細形状を原子間力顕微鏡により測定した結果、表面粗さは砥粒径に大きく依存し、粒径0.06 μm の砥粒ではナノメートルオーダーの表面粗さが得られることがわかった。また図6は、磁性流体の種類の違いによる表面粗さへの影響を調べた結果である。研磨時間に対する表面粗さの値はほぼ一定値を示しているが、ケロシンベースの磁性流体に比べ、水ベースの磁性流体の方が R_a , R_y ともに小さくなっている。この原因は、水ベースの磁性流体の方が粘度が高く、遠心力などによる砥粒の加工面に垂直な方向の運動が抑制されるためと考えられる。

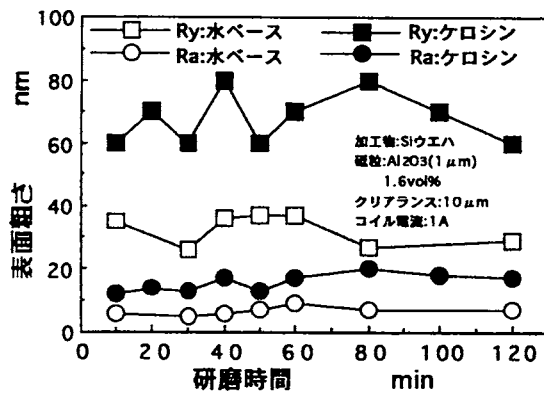


図6 研磨時間と表面粗さの関係

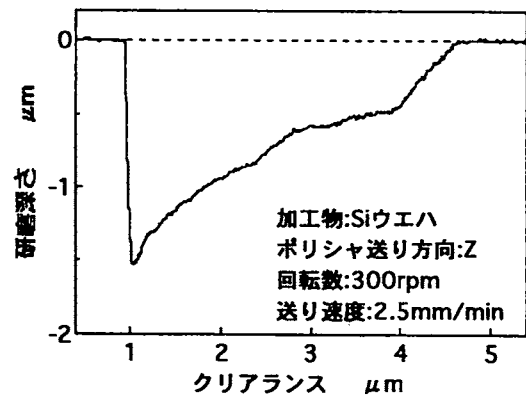


図7 リアランスと研磨深さの関係

4. 定切込み方式非接触表面研磨

4.1 研磨法の概念と実験方法

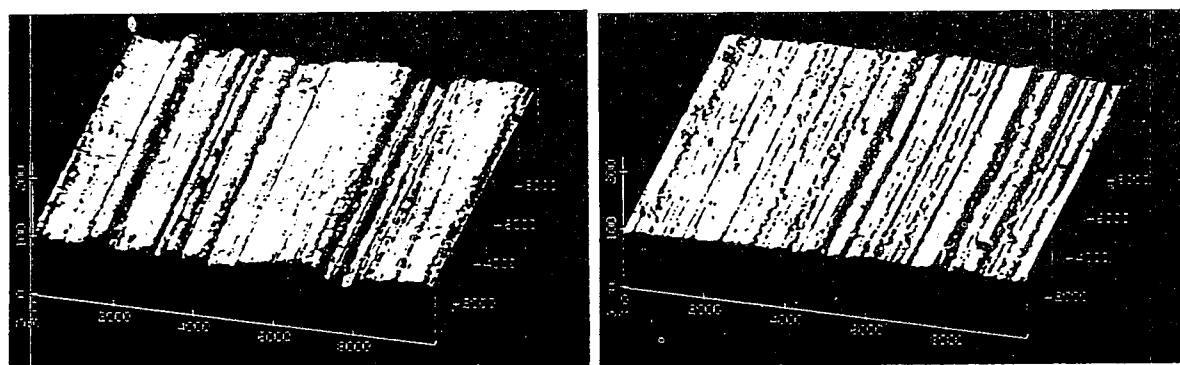
従来の定圧方式の非接触研磨法では、微細砥粒を分散させた加工液中で、ポリウレタンなどの柔軟性のある工具（ポリシャ）を一定の加工圧を加えながら回転させ、そのときに発生する流体潤滑状態によってポリシャと加工面間に流体膜によるわずかなすき間を形成し、ポリシャと加工面の非接触状態を実現している。

本研究では、柔軟性のあるポリシャの代わりに金属性のポリシャを使用し、それを一定速度で前加工面とわずかなすき間を保つようにしながら、設計値形状に沿って走査することにより研磨を行う。このとき、設計値との偏差が大きい箇所ではポリシャと加工面間のすき間が小さくなるため加工量は大きくなる。逆に、すき間が大きくなると加工量は減少し、結果として所定の設計値形状を得ることが可能になる。

実験に使用した研磨装置は2軸CNC方式でX、Z軸は静圧油スライドと静圧油ねじから構成されており、各軸の最小送り単位は $0.1\mu\text{m}$ である。主軸は静圧空気軸受スピンドルでその先端に銅製円盤状ポリシャが取り付けられている。ポリシャの外周面は、研磨装置上でのダイヤモンド切削加工により仕上げられている。砥粒は、粒径 $70\sim 95\text{nm}$ のコロイダルシリカ（砥粒濃度40wt%）を用いた。溶媒はイオン交換水とグリセリンを使用し、コロイダルシリカを体積比で50%混入した。

4.2 加工特性

ポリシャと加工面の間のすき間の大きさと加工深さの関係を調べるため、シリコンウエハをZ方向に水平に対して $1\mu\text{m}/2\text{mm}$ の割合で傾斜させ、Z方向の溝加工を行った。図7は加工した溝の幅中央部のZ方向の断面形状を測定した結果で、ポリシャー加工面間のクリアランスの大きさと溝深さの関係として表してある。この場合、クリアランスが



(a) グリセリン：0vol%

(b) グリセリン：50vol%

図8 研磨面の原子間力顕微鏡像

5 μm を超えるとほとんど加工が行われていないことがわかり、最小すき間が一定値を超えると加工作用が進行しないと考えられる。このことから、定切込み定速送り方式によるNC超精密研磨は可能であり、高精度な制御性をもつ加工機械を用いれば非球面などの修正研磨加工に適用できると考えられる。

4.3 加工液粘性の影響

加工液の粘性の表面粗さへの影響について調べるため、加工液にグリセリンを混入してフロート板ガラス表面の2mm角の範囲をトラバース研磨し、その表面微細形状を原子間力顕微鏡（AFM）により測定した。この結果を図8に示す。図の奥行き方向がポリシャの回転および送り方向と一致する。図から、グリセリンを混入しない場合、ポリシャ送り方向に直角な方向の形状に不規則性が顕著に現れているが、グリセリンを混入すると一様になっている。このように、加工液粘性が増大すると加工面の表面粗さが小さくなる原因としては、粘性が高くなると砥粒のポリシャ半径方向の移動速度が小さくなり、加工面への砥粒の衝突角度が水平方向に近くなって、加工面の応力場の寸法が小さくなったことが考えられる。

5. 結 言

硬ぜい性材料の高精度、高能率研磨加工法の開発を目的に、FFF (Field-assisted Fine Finishing) 加工の概念をさらに発展させ、電気泳動現象および磁性流体を利用した新しい超精密研磨法を提案して、その可能性について実験的な検討を行った。また、これらの研磨法を最近の超精密加工機械に適用し、超高精度なNC研磨加工を実現するための定切込み方式非接触研磨法を提唱し、その研磨機構などについて検討を進めた。

学位論文の審査結果の要旨

当該学位論文に関し、平成8年1月26日に第1回審査委員会を開き、面接審査を行った後、論文内容を詳細に検討した。さらに2月6日に行われた口頭発表の後に第2回審査委員会を開き、協議の結果以下のように判定した。

学位論文は、硬ぜい性材料の最終仕上げ研磨加工の高能率、高精度化を図るため、電場や磁場を応用した新しい表面研磨法を提案し、その可能性について実験的に検討を行ったものである。(Ⅰ)電気泳動現象を利用した超精密研磨法を開発し、液中の砥粒がもつ電気的な性質を利用して、加工面精度を低下させることなく研磨加工の高能率化が可能であることを示している。(Ⅱ)磁性流体を利用した新しい研磨法を開発し、磁場を利用することにより流体砥石を形成して、加工液を溜めるための研磨液槽や加工物の移し変えを必要としない、研削加工型の最終仕上げ研磨加工が可能であることを明らかにしている。(Ⅲ)コーナキューブプリズムとレーザ干渉測長機を利用して、調整やセッティングの簡便な主軸回転精度測定法を開発し、基準球などを用いずに超精密加工機械の主軸回転精度測定が可能であることを確認している。(Ⅳ)定切り込み方式の非接触型流体研磨法を提案し、金属製ポリシャを用いた研磨実験によりその可能性を確かめるとともに、加工液粘性を変えることにより加工面粗さを制御できることを明らかにし、NC方式の新しい表面研磨法への発展の可能性を示している。

以上の研究成果は、硬ぜい性材料の最終仕上げ加工に関していくつかの重要な知見を得たものであって、本論文は博士論文に値すると判定した。